

УДК 669.28:519/87

©Петрищев А.С.¹, С.М. Григорьев²

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ОКАЛИНЫ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

Выполнена разработка и оптимизация многофункциональной системы зависимостей технико-экономических показателей металлизации окалины быстрорежущих сталей. Определены и исследованы оптимальные области технико-экономических показателей и расходных коэффициентов, в результате чего выявлена возможность повышения качества полученного материала с наиболее предпочтительным содержанием легирующих элементов в нем и снижение себестоимости выплавки стали с его использованием.

Ключевые слова: техногенные отходы, легирование, сталь, легирующие элементы, математическая модель, себестоимость, технико-экономические показатели.

Петрищев А.С., Григор'єв С.М. Математична модель оптимізації техніко-економічних показників металізації окалини швидкорізальних сталей. Виконано розробку та оптимізацію багатофункціональної системи залежностей техніко-економічних показників металізації окалини швидкорізальних сталей. Знайдено та досліджено оптимальні області техніко-економічних показників та витратних коефіцієнтів, в результаті чого виявлено можливість підвищення якості одержаної сировини з найбільш раціональним вмістом легуювальних елементів в ній та зниження собівартості виплавки сталі з його використанням.

Ключові слова: техногенні відходи, легування, сталь, легуювальні елементи, математична модель, собівартість, техніко-економічні показники.

¹ аспирант, ЗНТУ, «Запорожский национальный технический университет», г. Запорожье

² д-р техн. наук, доцент, ЗНУ «Запорожский национальный университет», г. Запорожье

A.S. Petryshchev, S.M. Grygor'ev. Mathematical model of optimization of technical-and-economic indices of metallization of the oxide scale of rapid tool steels. Working out and optimisation of multipurpose system of dependences of technical-and-economic indexes of metallization of scale of fast-cutting steels were carried out.. Optimal areas of technical-and-economic indices and consumption factors were found out, resulting to the possibility of improving the quality of the produced materials with the most preferable content of alloying element, leading to reduction in production costs after its implementation.

Keywords: *a technogenic waste, alloying, a steel, alloying elements, mathematical model, the cost price, technical-and-economic indexes.*

Постановка проблемы и анализ последних публикаций. В последние годы научной общественностью активно обсуждаются вопросы ресурсо- и энергосбережения в промышленном производстве металлопродукции [1,2]. Предложены и внедряются эффективные и достаточно оригинальные технико-экономические решения, позволяющие существенно сократить отставание в этом направлении [3,4]. Среди них отчетливо выделяются 2 направления: производство легирующих материалов и специальных сплавов с качественно новыми технологическими свойствами и развитие направления переработки техногенных отходов и вторичного сырья, позволяющих существенно повысить степень использования ценных ингредиентов, многие из которых поставляются из-за рубежа. В этом достигнуты определенные и промышленно-значимые результаты, однако резервы далеко не исчерпаны.

Установлено, что степень использования легирующих элементов в порошковом производстве быстрорежущих сталей не превышает 80 %, а в процессе выплавки быстрорежущей стали в открытых дуговых печах этот показатель значительно меньше, так как выход годного находится на уровне 36-42 %. Обрезь, окалина, пыль силового шлифования товарных заготовок, циклонная пыль и некондиционный порошок составляют основную долю отходов. При введении в жидкую ванную мелкодисперсных отходов без предварительной подготовки угар редких металлов достигает 40 %, а с окалиной при производстве мелкосортных товарных заготовок в лучшем случае теряется 12 % от объемов производимой продукции [5]. Утилизация является резервом снижения их себестоимости [6,7].

Украина не имеет собственной минерально-сырьевой базы для производства легирующих материалов на основе редких и тугоплавких элементов. Потребность у них удовлетворяется импортными поставками с ближнего и дальнего зарубежья. Особенно эта проблема обострилась в последние годы, в связи со стремительным ростом цен на них на мировом рынке потребления [8]. Поэтому разработка отечественных ресурсо- и энергосберегающих технологий молибден- и вольфрамсодержащих сплавов и лигатур, тем более с параллельной утилизацией немобильных отходов (окалина быстрорежущих сталей) представляет не только научный, но, прежде всего, практический промышленный интерес [9].

Комплекс исследований и результат внедрения технологий предварительной подготовки техногенных отходов с получением на их основе нетрадиционных легирующих и раскисляющих материалов [9, 10] и последующим использованием при выплавке инструментальных и быстрорежущих сталей позволили установить ряд закономерностей. Выявлено, что наибольшую сложность при возврате в сталеплавильное производство создает группа металлооксидных и мелкодисперсных отходов, отличающихся формой присутствия ведущих легирующих элементов, развитой поверхностью реагирования и высокой степенью загрязнения сопутствующими вредными примесями.

В случае использования мелкодисперсных оксидных отходов, не загрязненных сопутствующими примесями серы и фосфора, экономически целесообразна металлизация в гетерогенной системе без появления жидких фаз [9,11].

Цель - разработка технологии получения металлизированной окалины быстрорежущих сталей и ее использование при выплавке стали, а конкретные задачи данного этапа исследований состояли в построении и оптимизации многофункциональной модели системы зависимостей технико-экономических показателей металлизации окалины быстрорежущих сталей.

Изложение основного материала. В работе были использованы материалы активного промышленного эксперимента металлизации окалины быстрорежущих сталей и применение полученного материала для легирования специальных сталей.

Задача комплексного легирования с одновременной утилизацией металлургических отходов достигается тем, что шихта включает окалину быстрорежущих сталей (Р6АМ5, Р6М5К5, Р6М5Ф3) с углеродным восстановителем с добавлением молибденового, соответственно ТУ 14-5-88-77, и вольфрамового, соответственно ГОСТ 213-83, оксидных концентратов.

С целью достижения оптимальных свойств целевого продукта с учетом комплексного влияния состава шихты на экономию от использования металлизированного сырья для легирования сталей использовался регрессионный анализ [12].

Факторы и значения переменных, которые исследовались в работе, представлены в таблице 1.

Исследована взаимосвязь процессов и экспериментально построена функциональная зависимость, что позволило с некоторой достоверностью использовать ее в планировании ожидаемых технико-экономических показателей. Общее снижение себестоимости, которое зависит от многих факторов, можно описать с помощью нелинейной множественной регрессии. Оценки коэффициентов регрессионной модели находим с помощью МНК (метода наименьших квадратов) в матричной форме. В результате была получена математическая модель, которая имеет следующий вид:

$$y = -765,824 + 769,1042 \cdot \left(\frac{1}{x_1}\right) + 62,095 \cdot \left(\frac{1}{x_2}\right) + 166,888 \cdot \ln x_3 - 0,0029 \cdot x_4^2 - 0,4606 \cdot \sqrt{x_5}, (1)$$

Исследуемые технико-экономические показатели производства металлизированной окалины быстрорежущих сталей

Номер шихты	Фактор					
	Окалина быстро- режущих сталей, % мас.	Углеро- дистый восста- новитель, % мас.	Усвоение молибдена и вольфрама при выплав- ке стали, %	Обожжен- ный молиб- деновый концентрат, % мас.	Вольфрамовый (шеелитовый концентрат), % мас.	Сокращение времени леги- рования рас- плава, %
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
1	39,5	9,9	94	43,1	0	13
2	39,75	9,85	94,5	42,85	0	13,25
3	40	9,8	95	42,6	0	13,5
4	40,2	9,75	95,25	42,4	0	14,75
5	40,4	9,7	95	42,2	0	16
6	40,45	9,65	96	35,75	6,4	17
7	40,5	9,6	96,5	29,3	12,8	18
8	43	9,2	96,75	27	11,8	17,75
9	47	8,9	96,87	25	10,9	17,62
10	49,8	8,7	97	23,2	10,1	17,5
11	53,65	8,35	97,25	20,55	9,05	17,25
12	55,57	8,17	97,37	19,22	8,52	17,12
13	57,5	8	97,5	17,9	8	17
14	59,7	7,8	97,37	16,37	7,45	16,87
15	61,9	7,6	97,25	14,85	6,9	16,75
16	66,3	7,2	97	11,8	5,8	16,5
17	68,22	6,9	96,87	10,4	5,5	16,5
18	70,15	6,6	96,75	9	5,2	16,5
19	74	6	96,5	6,2	4,6	16,5
20	74,05	5,95	96,25	3,1	7,65	16
21	74,1	5,9	96	0	10,7	15,5
22	74,3	5,85	96	0	10,85	15,25
23	74,5	5,8	96	0	11	15
24	74,75	5,75	95,5	0	10,4	14,5
25	75	5,7	95	0	9,8	14

При построении структуры регрессии, с одной стороны, нужно включить в регрессию все факторы, которые имеют существенное статистическое влияние на показатель, а с другой стороны, нужно, чтобы было выполнено условие линейной независимости между факторами, то есть отсутствие мультиколлинеарности для эффективного применения МНК. Методом Фаррара-Глобера исследуем в модели (1) присутствие мультиколлинеарности. Проверка по помощи теста χ^2 показала, что с надежностью $p = 0,95$ существует общая мультиколлинеарность.

Из вида корреляционной матрицы был сделан вывод, при котором между факторами x_1 и x_3 существует тесная связь. Поскольку влияние на показатель y фактора x_3 более значительное ($\text{гyx}_1=0,08$, $\text{гyx}_3=0,89$), то из регрессии исключаем фактор x_1 для устранения мультиколлинеарности.

С учетом преобразований математическая модель приобретает следующий вид:

$$y = -729,811 + 18,791 \cdot \left(\frac{1}{x_2} \right) + 162,089 \cdot \ln x_3 + 0,002 \cdot x_4^2 + 0,722 \cdot \sqrt{x_5}, \quad (2)$$

Проверка при помощи теста χ^2 показала, что мультиколлинеарность осталась, но значительно уменьшилась: на 49,05% в сравнении с предыдущим случаем.

t-тест на значимость коэффициентов регрессии показал, что все параметры регрессии значимые, то есть ни один из факторов нельзя исключить из регрессии.

Согласно проверки при помощи критерия Фишера полученная модель адекватная статистическим данным. ($F = 44,838$, $F_{\text{крит}} = 2,87$).

Коэффициенты регрессии с надежностью $p = 0,95$ находятся в таких пределах:
 $-1048,9536 < \beta_0 < -410,6679$; $-20,2658 < \beta_2 < 57,8487$; $93,5979 < \beta_3 < 230,5803$;
 $3,2 \cdot 10^{-5} < \beta_4 < 4,6 \cdot 10^{-3}$; $0,6422 < \beta_5 < 0,8023$.

Значение "y" и доверительные интервалы для регрессии указаны на рис. 1, из которого имеем графическое подтверждение расчетных значений, что полученная модель удовлетворительно соответствует практическим данным.

Для наглядного анализа полученной модели построены три наиболее значимых с практической точки зрения частичные зависимости в виде поверхностей на рис. 2-4 с закреплением некоторых параметров: $y_1=f(x_2, x_4) - x_3=96,5\%$, $x_5=0$ мас.; $y_2=f(x_3, x_4) - x_2=9,85$ % мас.,

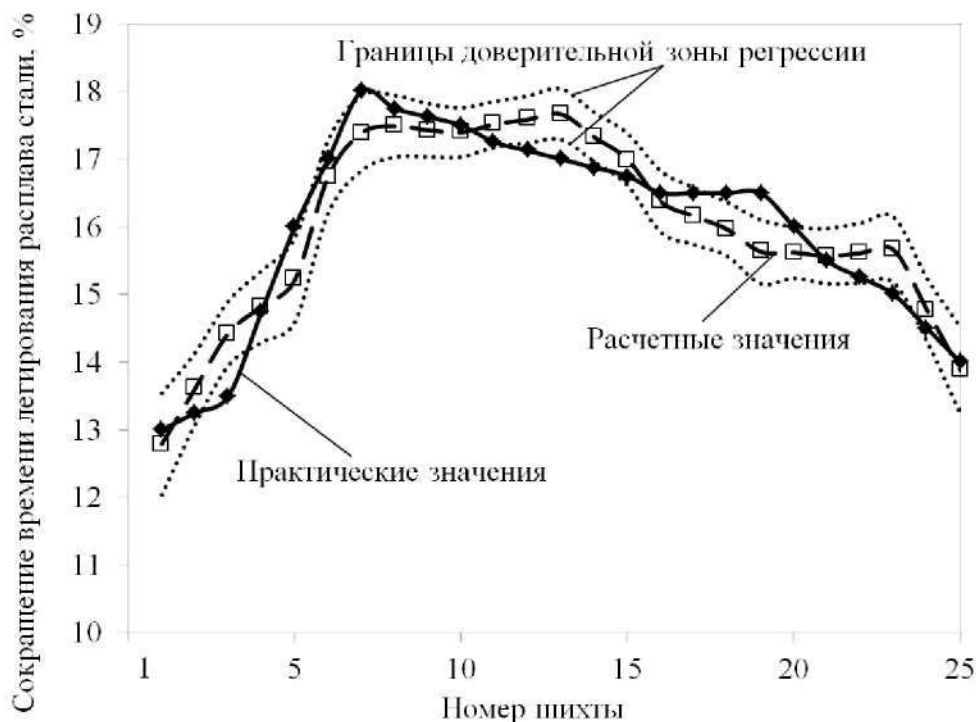


Рис. 1 - Практические и расчетные значения сокращения времени легирования расплава стали с обозначением верхней и нижней границы 95% доверительной зоны регрессии

$x_5 = 4,6\% \text{ мас.}; y_3 = f(x_4, x_5) - x_2 = 9,65\% \text{ мас.}, x_3 = 96\%.$

Проведенная работа позволяет выявить оптимальные области технико-экономических показателей и расходных коэффициентов исходных материалов с дальнейшей оптимизацией технологических параметров и состава шихты и снижением потерь легирующих элементов в процессе восстановления и при выплавке сталей с использованием металлизированного сырья с учетом уже достигнутых результатов данного направления. При этом одновременно учитывается влияние сразу четырех факторов на снижение себестоимости целевого продукта.

С помощью поверхностей, изображенных на рис. 2-4 возможно визуально проследить комплексное влияние факторов и высчитать оптимальные условия для повышения экономии при выплавке стали. Исходя из анализа построенной модели, для обеспечения высокого качества металлизированной окалины с наиболее выгодным содержанием легирующих элементов в ней, что дает значительное снижение себестоимости выплавки стали, оптимальные области технико-экономических показателей принимают следующие значения (табл. 2):

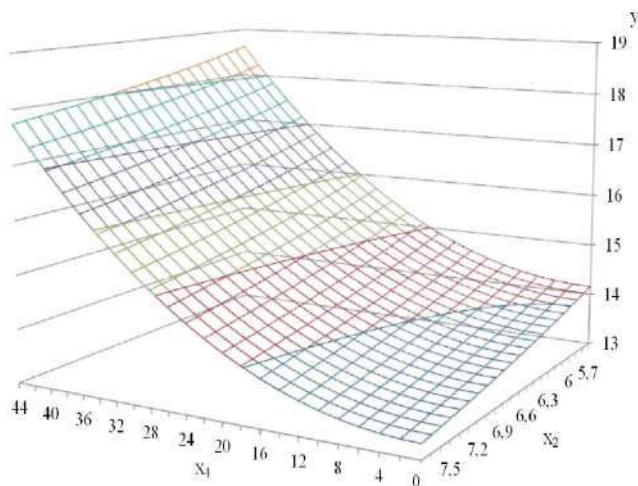


Рис. 2 - Зависимость сокращения времени легирования расплава с использованием металлизированного вторичного сырья, % (y) от содержания (% мас.) углеродистого восстановителя (x_2) и обожженного молибденового концентрата в шихте (x_4)

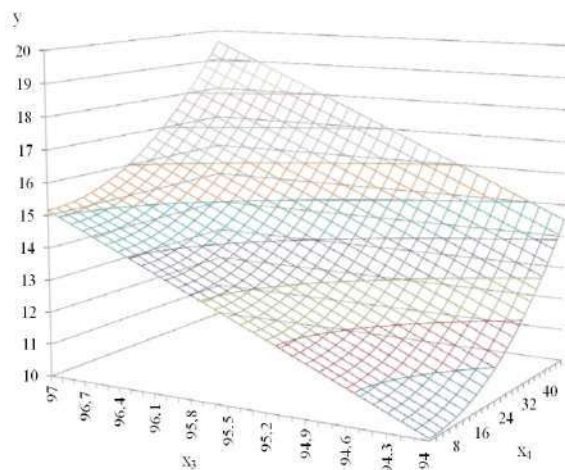


Рис. 3 - Зависимость сокращения времени легирования расплава с использованием металлизированного вторичного сырья, % (y) от степени усвоения молибдена и вольфрама при выплавке стали, % (x_3) и содержания обожженного молибденового концентрата в шихте, % мас. (x_4)

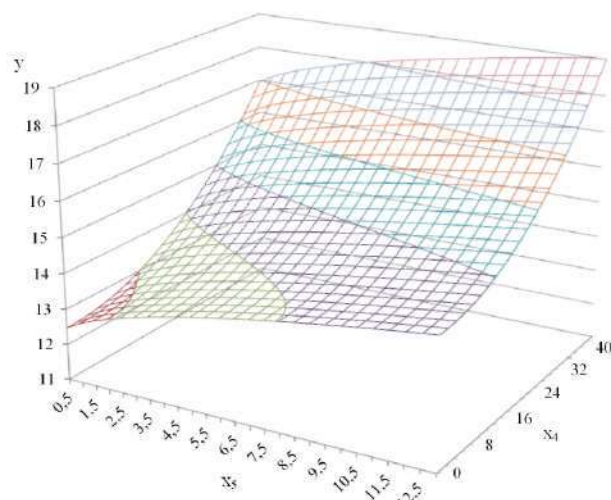


Рис. 4 - Зависимость сокращения времени легирования расплава с использованием металлизированного вторичного сырья, % (y) от содержания обожженного молибденового концентрата (x_4) и вольфрамового (шеелитового концентрата) в шихте (x_5), % мас.

Установленная высокая технико-экономическая эффективность использования исследуемого легирующего материала при выплавке быстрорежущих сталей. При завалке брикетов из металлизированной окалины россыпью и в капсулах в количестве 150-320 кг/т усвоение легирующих элементов было (в среднем, % мас.): Cr – 95,3; W – 97,9; Mo – 96,7 соответственно.

Таблица 2

Оптимальные области исследуемых технико-экономических показателей получения и использования металлизированной окалины быстрорежущих сталей с добавлением молибденового и вольфрамового оксидных концентратов (x_2, x_3, x_4, x_5)

Границы оптимальных значений факторов	Углеродистый восстановитель, % мас.	Усвоение молибдена и вольфрама при выплавке сталей, %	Обоженный молибденовый концентрат, % мас.	Вольфрамовый (шеелитовый концентрат), % мас.
	x_2	x_3	x_4	x_5
Min	8	96	19,22	7,45
Max	9,7	97,5	29,3	10,9

Наблюдалось некоторое повышенное шлакообразование для переплавного способа получения порошковой быстрорежущей стали, однако, в пределах требований технологической инструкции. Повышенное относительно завалки брикетов россыпью усвоение легирующих элементов при введении их в капсулах связано со снижением окислительного потенциала в связи с понижением прямого контакта брикетов с окислительной средой печи [7].

Выводы

Построенная математическая модель позволила установить и исследовать оптимальные области технико-экономических показателей и расходных коэффициентов, в результате чего выявлена возможность повышения качества металлизированной окалины быстрорежущих сталей с наиболее выгодным содержимым легирующих элементов в ней и повышения степени усвоения легирующих элементов с использованием металлизированного вторичного сырья. Оптимальное содержание углеродистого восстановителя в шихте находится в пределах 8...9,8 % мас., обоженного молибденового концентрата – 19,22...29,3% мас., вольфрамового (шеелитового концентрата) – 7,45...10,9% мас. при степени усвоения молибдена и вольфрама при выплавке стали 96...97,5 %. Полученные данные позволили оптимизировать параметры расходных коэффициентов. Значительная экономия ценных легирующих элементов при выплавке быстрорежущих сталей с применением исследуемого металлизированного сырья подтверждает инновационную целесообразность производства нового легирующего материала в Украине и его использование в металлургии специальных сталей.

Список использованных источников:

1. Волюнкина Е.П. Отходы металлургического предприятия: от анализа потерь к управлению / Волюнкина Е.П., Протопопов Е.В. // Изв. вузов. Черная Металлургия. - 2005. - №6. - С. 72-76.
2. К. Хильман. Энергетически эффективный рециклинг остаточных железорудных материалов / К. Хильман, Т. Хаук // Черные металлы. – 2008. - №5. –С.41-43.
3. Григор'єв С.М. Стратегічні й тактичні напрями ресурсо- та енергосбереження в металургії важкотопких легувальних матеріалів і спеціальних сталей / С.М. Григор'єв // Держава та регіони: Серія "Економіка та підприємництво". -2009 - №6. - С. 70-76.
4. Григор'єв С.М. Рентгеноструктурний фазовий аналіз та мікроскопічне дослідження при одержанні сплаву для легування та розкислення швидкорізальної сталі / С.М. Григор'єв, А.С. Петрищев // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.- 2009.- №1.- С. 42-45.
5. Григорьев С.М. Извлечение тугоплавких элементов из окалины быстрорежущей стали / С.М. Григорьев // Сталь. - 1994. - №3. - С. 63-66.
6. Пивень А.Н. Экономическая эффективность утилизации редких металлов из окалины быстрорежущих сталей / А.Н. Пивень, С.М. Григорьев // Цветные металлы. -1993. - № 3. - С. 10-11.
7. Григор'єв С.М. Оптимізація показників економіко-математичної моделі виробництва сплаву для легування та розкиснення швидкорізальних сталей / С.М. Григор'єв, А.С. Петрищев // Держава та регіони. – Запоріжжя: КПУ. - 2011. - №1. - С. 39-43.
8. Х.Ю. Керкхофф. Взрыв цен на сырье – угроза экономическому подъему / Х.Ю. Керкхофф //

Черные металлы. - 2010. - №10. - С. 61-66.

9. Григорьев С.М. Особенности фазовых и структурных превращений при металлизации окислы быстрорежущей стали / С.М. Григорьев, А.С. Петрищев // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.- 2011.- №1.- С. 31-35.

10. Григорьев С.М. Оптимизация технологических параметров получения и использования сплавов для легирования и раскисления быстрорежущих сталей / С.М. Григорьев, А.С. Петрищев // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.- 2008.- №1.- С. 61-66.

11. Ахметов А.Б. Восстановление железа из железоуглеродистых брикетов при плавке стали в дуговых электропечах / А.Б. Ахметов, С.О. Байсанов, Р.Ш. Ахтанова [и др.] // Сталь. - 2007. - №8. - С. 39-42.

12. Лук'яненко І. Г. Економетрика / І. Г. Лук'яненко, Л. І. Краснікова - К.: Товариство "Знання", КОО, 1998. - 494 с.

Bibliography:

1. Volynkina E.P. Waste of the metallurgical factory: from the analysis of losses to management / Volynkina E.P., Protopriests E.B. // Proceedings high schools. Ferrous metallurgy. - 2005. - №6. - P. 72-76. (Rus.)

2. K.Hilman. Energetically effective recycling the residual iron-ore materials / K.Hilman, T.Hauk // Ferrous metals. - 2008. - №5.-P.41-43. (Rus.)

3. Grigoriev S.M. Strategic and tactical directions resurso - and energy saving in metallurgy refractory alloying materials and special steels / Grigor'ev S. M// State and regions: a Series "Economy and business"-2009 - №6. - P. 70-76. (Ukr.)

4. Grigoriev S.M. X-ray phase analysis and microscopic research at reception of an alloy for alloying and deoxidization a fast-cutting steel / Grigoriev S.M., Petrishchev A.S.//New materials and technologies in metallurgy and manufacturing. - 2009.№1. - P. 42-45. (Ukr.)

5. Grigoriev S.M. Extraction of refractory elements from a rapid tool steel calx / Grigorev S.M.//Steel. - 1994. - №3. - P. 63-66. (Rus.)

6. Piven A.N. Economic efficienc of salvaging of rare metals from a calx of rapid tool steels / A.N.Piven, S.M.Grigoriev//Non-ferrous metals.-1993. - № 3. - P. 10-11. (Rus.)

7. Grigoriev S.M. Optimizatsija of indicators economic mathematical model of manufacture of an alloy for alloying and deoxidization a fast-cutting steels / Grigoriev S.M., Petrishchev A.S.// State and regions. - Zaporozhye: KPU. - 2011. - №1. - P. 39-43. (Ukr.)

8. H.J.Kerkhoff. Explosion of the prices for raw materials - threat to economic lifting / H.J.Kerkhoff // Ferrous metals. - 2010. - №10. - P. 61-66. (Rus.)

9. Grigoriev of S.M.feature of phase and structural transformations at metallization of a calx of a rapid tool steel / Grigorev S.M., Petrishchev A.S.// New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering. - 2011.№1. - P. 31-35. (Rus.)

10. Grigoriev S.M. Optimisation of technological parametres of reception and use of alloys for alloying and a deoxidation of rapid tool steels / Grigorev S.M., Petrishchev A.S.// New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering. - 2008.№1. - P. 61-66. (Rus.)

11. Ahmetov A.B. Restoration of iron from iron-carbon cakes at steel fusion in arc furnaces / Ahmetov A.B., Bajsanov S.O., Ahtanova R. Sh [etc.]// Steel. - 2007. - №8.- P. 39-42. (Rus.)

12. Luk'janenko I. G.Ekonometrika / Luk'janenko I. G, Krasnikova L.I. - K: Comradeship "Znannja", KOO, 1998. - 494 p. (Ukr.)

Рецензент: В.Б. Волков,

д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «Запорожский национальный университет»

Статья поступила 22.11.2011